

TKK SÄHKÖTEKNIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

17784

Annika Lillqvist

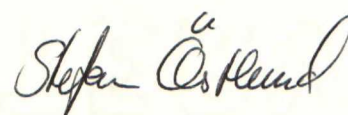
BERÄKNING AV LÄCKINDUKTANS OCH STRÖMFÖRDELNING
MELLAN LINDNINGARNA I EN HÖGFREKVENSTRAKTIONS-
TRANSFORMATOR

Diplomarbete som inlämnats för granskning som lärdoms-
prov för avläggande av diplomingenjörsexamen, Esbo
den 6.4.90

Övervakare


Tapani Jokinen

Handledare


Stefan Östlund

Utfört av : Annika Lillqvist	
Arbetets namn: Beräkning av läckinduktans och strömfördelning mellan lindningarna i en högfrekvenstraktionstransformator	
Datum: 15.3.90	Sidoantal: 45
Avdelning: Elektroteknik	Professur: Svt-17 Elektroteknik (Elektromekanik)
Övervakare: Tapani Jokinen	
Handledare: Stefan Östlund	
<p>Nyckelord: <u>Traktionstransformator</u>, <u>läckinduktans</u>, <u>strömdelning</u>, <u>hög frekvens</u>.</p> <p>Detta arbete behandlar dimensioneringen av en loktransformator. Traktionsfrekvensen i Sverige är 16 2/3 Hz. En loktransformator, som matas med denna frekvens, är mycket tung. Genom att höja frekvensen internt i loket kan transformatorns vikt reduceras utan att effekten minskar.</p> <p>En dylik krets för höjning av frekvensen ställer särskilda krav på transformatorn. För reduktion av övertoner i strömmen har transformatorn fyra primärlindningar. Dessa är seriekopplade och matas antingen med ström eller förbikopplas. Den ojämna matningen gör att lindningarnas placering i kärnfönstret är ytterst viktig. Strömfördelningen i de fyra parallellkopplade sekundärlindningarna kan bli ojämn, om lindningarna inte är placerade på lämpligt sätt.</p> <p>Den speciella kretsen i loket ställer också krav på läckinduktansen i transformatorn. För att kommuteringen av tyristorerna i kretsen skall kunna ske snabbt krävs en låg läckinduktans.</p> <p>Några lindningskonfigurationer har studerats analytiskt och med fältberäkningsprogrammet Ace. En trebenstransformator med nämnda kriterier, jämn strömfördelning och låg läckinduktans, har dimensionerats. Transformatorn har fyra primärlindningar bredvid varandra och fyra sekundärlindningar fördelade runt primären två och två. Sekundärlindningarna är axiellt delade.</p> <p>En transformator för en genomgångseffekt på 5 MVA har beräknats för en läckinduktans på 3 mH, vilket motsvarar 7 %. Strömdelningen har gjorts jämnare genom att insätta extra isolering mellan primär- och sekundärlindningarna som ligger närmast transformatorns mittben.</p> <p>Lindningarnas och kärnans sammanlagda vikt har beräknats till 1.7 ton, vilket är en aning i underkant. Troligen beror detta på att lindningarnas bredd har underskattats.</p>	

Förord

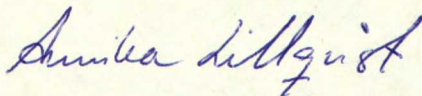
Detta diplomarbete har gjorts vid Institutionen för Elektriska maskiner och Kraftelektronik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, under hösten 1989 under ledning av tekn.lic. Stefan Östlund. Jag vill varmt tacka honom för det stöd och för den hjälp han givit mig under arbetets gång.

Till institutionens föreståndare Fredrik Gustavsson vill jag rikta ett tack för de värdefulla råd och synpunkter han bidragit med. Institutionens personal tackar jag för en god arbetsmiljö och avspänd stämning.

Professor Tapani Jokinen, som fungerat som övervakare av arbetet, vill jag tacka för en synnerligen positiv inställning till utförandet av diplomarbetet i Sverige.

Erik tackar jag för stöd och uppmuntran i arbetets svåra stunder.

Helsingfors den 15 mars 1990



Annika Lillqvist

Innehållsförteckning

Sammandrag	2
Förord	3
Innehållsförteckning	4
Symboler och beteckningar	5
1. Inledning	7
2. Beskrivning av kretsen	8
2.1 Syfte med kretsen	8
2.2 Huvudkomponenter	8
2.3 Funktion	9
3. Krav på transformatorn	12
3.1 Lindningar	12
3.2 Läckinduktans	12
3.3 Storlek	12
3.4 De uppställda kravens inverkan vid transformatorns dimensionering	12
4. Läckinduktans och dess beräkning	14
4.1 Analytisk beräkning	15
4.2 Beräkning med finita elementmetoden	18
5. Matematisk beskrivning av flerlindningstransformatorn	21
5.1 Tvålindnings- eller kortslutningimpedans	21
5.2 Trelindnings- eller kortslutningsömsimpedans	22
5.3 Ett godtyckligt antal lindningar	23
5.4 Tillämpning av impedansmatrisen	24
6. Utvärdering av tänkbara alternativ	26
6.1 Kärn- och lindningstyper	26
6.2 Några grundmodeller	27
6.3 Den slutliga modellen	30
6.4 Alternativ tvåbenstransformator	31
7. Dimensionering av vald transformator	32
7.1 Loktransformatorns typeffekt	32
7.2 Kärna och lindningar	33
7.3 Strömfördelning mellan lindningarna	36
7.4 Lindningsförluster	38
7.5 Exempel på traktionstransformator	41
8. Slutsatser	44
9. Referenser	45

Symboler och teckenförklaring

A_{cu}	koppararea	m^2
A_k	nettokärnarea	m^2
A_l	nettolindningsarea	m^2
B	flödestäthet	T
$b_{fö}$	fönsterbredd	m
d	ledartjocklek	m
E	elektromotorisk kraft	V
f	frekvens	Hz
H	magnetisk fältstyrka	A/m
$h_{fö}$	fönsterhöjd	m
I	ström	A
i_p	ström i primärlindning	A
i_s	ström i sekundärlindning	A
j	strömtäthet	A/m ²
K	Rogowskifaktor	
k	parameter	
L_k	läckinduktans	H
l_h	lindningshöjd	m
$l_{1,2}$	lindningsdiameter	m
$l_{1,6}$	lindningsomkrets	m
M	vikt	kg
m	antal ledare i axiell riktning	
N	varvtal	
n	omsättning	
n	antal ledare i radiell riktning	
P_{dc}	likströmsförluster	W
P_v	virvelströmsförluster	W
p	parameter	
R_{dc}	resistans vid likström	Ω
R_k	resistans	Ω
R_v	resistans vid växelström	Ω
r	kärnradie	m
r_{tp}	radie för tyngdpunkt	m
$r_{1,2}$	lindningsradie	m

S_g	genomgångseffekt	VA
S_{typ}	typeffekt	VA
t_1	isolering mellan primär- lindningar	m
t_2	isolering mellan primär- och sekundärlindning	m
V_k	kärnvolum	m^3
V_l	lindningsvolum	m^3
W	magnetisk energi	Ws
X_k	reaktans	Ω
x	bredd för ok och ben	m
x_1	sekundärlindningens bredd	m
x_2	primärlindningens bredd	m
Z_{ab}	tvålindningsimpedans	Ω
Z_{abc}	trelindningsimpedans	Ω
Z_k	serieimpedans	Ω
z	extra isolering	m
α	ledarhöjd	m
β	ledarbredd	m
γ	densitet	kg/m^3
η_{cu}	fyllfaktor för lindningsmaterial	
η_k	fyllfaktor för kärnmaterial	
μ_0	permeabilitet	Vs/Am
ρ	resistivitet	Ωm
σ	konduktivitet	$1/\Omega m$
ω	vinkelhastighet	rad/s

1. Inledning

Det här arbetet behandlar en traktionstransformator för tex ett lok eller ett lokaltåg. Transformatorn behövs i loket för att förvandla nätspänningen på 15 kV till en lämplig nivå för den drivutrustning, som används. Nätfrekvensen är $16 \frac{2}{3}$ Hz. Frekvensen är låg av historiska orsaker. Sveriges järnvägar elektrifierades tidigt, redan i början på 1900-talet. Enfaskommutatormotorn, som vid den tiden var den enda växelströmsmotorn med styrbart varvtal, krävde en låg matningsfrekvens. Därför valdes traktionsfrekvensen till $16 \frac{2}{3}$ Hz. Den låga frekvensen gör att transformatorn utgör en betydande del av lokets vikt och volym.

I många fall är det intressant att kunna reducera fordonets vikt. Exempel på tillämpningar där låg vikt eftersträvas är snabbtåg och lokaltåg. Genom att omvandla nätspänningen internt i loket till en högre frekvens kan transformatorn göras mindre och lättare. En förhöjd frekvens ökar transformatorns effekttäthet och transformatorns dimensioner kan därmed minskas, utan att typeffekten ändras.

Den speciella kretsen i loket för detta ändamål ställer särskilda krav på transformatorn. För att kunna reducera övertoner i nätströmmen har transformatorn fyra seriekopplade primärlindningar. Beroende på nätspänningens momentanvärde kan en till fyra lindningar vara inkopplade. Sekundärlindningarna är också fyra till antalet, men de är parallellkopplade och alla är alltid samtidigt inkopplade. Antalet sekundärlindningar bestäms av fordonets totala effekt. Den begränsande parametern är effekthanteringsförmågan hos de strömriktare som är anslutna till sekundärlindningarna. Ett fordon med lägre effekt kan mycket väl klara sig med två sekundärlindningar. Antalet sekundärlindningar har ingen principiell betydelse för kretsens funktion. Fallen med två eller fyra lindningar är i många avseenden ekvivalenta. I detta fall har fyra lindningar valts för att detta förväntas ge de största svårigheterna. Två lindningar är ett enklare specialfall av fyra lindningar. Eftersom de inkopplade primärlindningarnas antal varierar kan strömfördelningen i sekundärlindningarna bli ojämn. De olika lindningarnas inbördes placering blir därför mycket viktig för strömfördelningen mellan lindningarna.

Växelriktaren på transformatorns primärsida kommuteras via transformatorn. För att detta skall kunna ske snabbt krävs att transformatorn har en låg läckinduktans.

I detta arbete har de två ovannämnda kriterierna, låg läckinduktans och jämn strömfördelning, studerats och några möjliga modeller har utarbetats.

2. Beskrivning av kretsen

2.1 Syfte med kretsen

Transformatorn i ett lok väger åtskilliga ton, typiskt 10-11 ton för en typeffekt på 5 MVA och frekvensen 16 2/3 Hz. Om matningsfrekvensen höjs kan vikten och volymen minskas. Det framgår av följande ekvation gällande för sinusformade storheter.

$$S = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \hat{B} f j A_k A_l \quad (2.1)$$

f = frekvensen
 j = strömtätheten
 A_k = järnkärnans area
 A_l = lindningarnas area
 \hat{B} = toppvärdet hos flödestätheten
 S = typeffekten

Transformatoreffekten bibehålls, när frekvensen höjs, om man i samma proportion minskar på A_l och A_k .

Enligt Östlund (1988) är 200 Hz en lämplig transformatorfrekvens för denna krets. För ett system med intern växelriktare och 200 Hz transformator kan en viktninskning på drygt 30 % erhållas vid 5 MVA, jämfört med en transformator för 16 2/3 Hz.

2.2 Huvudkomponenter

Kretsen matas med en enfassspänning på 15 kV och frekvensen 16 2/3 Hz. Systemet består av följande komponenter, se fig 2.1.

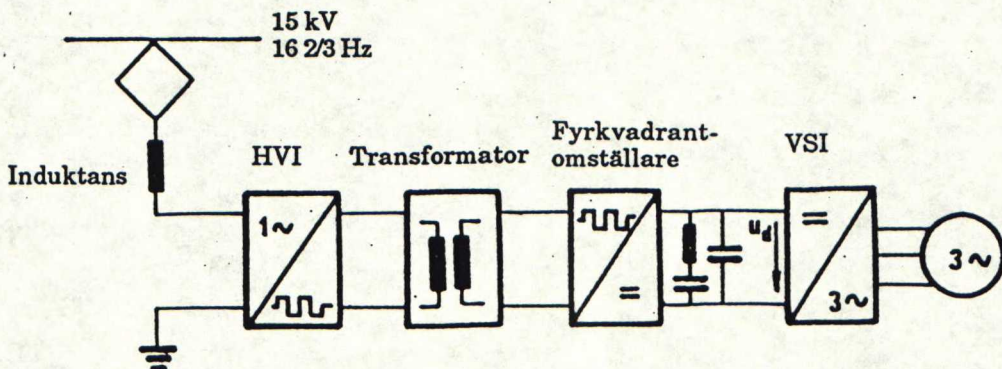


Fig 2.1 Kretsen i loket

Närmast nätet finns en induktans L_s . Den behövs för att glätta nätströmmen och för att skydda mot höga strömderivator.

Sedan följer en naturligt kommuterad växelriktare (HVI), som befinner sig på transformatorns högspänningssida. Den höjer frekvensen genom att hacka upp nätspanningen. Transformatorn är ansluten till växelriktarens högfrekvenssida. Den är konstruerad för en betydligt högre frekvens än inmatningsfrekvensen. På sekundärsidan av transformatorn finns en fyrkvadrantställare (4QC) och ett likspänningsmellanled med en efterföljande växelriktare för omvandling till 3-fasspänning för matning av en 3-fas asynkronmotor. Fyrkvadrantställaren är självkommuterad. Filtrets uppgift i mellanledet är att eliminera den andratons komponent i effekt som uppstår vid likriktning av enfasspänningen.

2.3 Funktion

Högspänningsväxelriktaren HVI är naturligt kommuterad. Kommuteringsspänningen fås från spänningsmellanledet och fyrkvadrantställaren. Fig 2.2 visar en schematisk bild av kretsen under den positiva halvperioden av strömmen. Transformatorn representeras av läckinduktansen L_k . Likspänningen antas vara konstant, lika med U_d , och lasten Z representerar andratons filtret, glättningskondensatorn, växelriktaren och motorn.

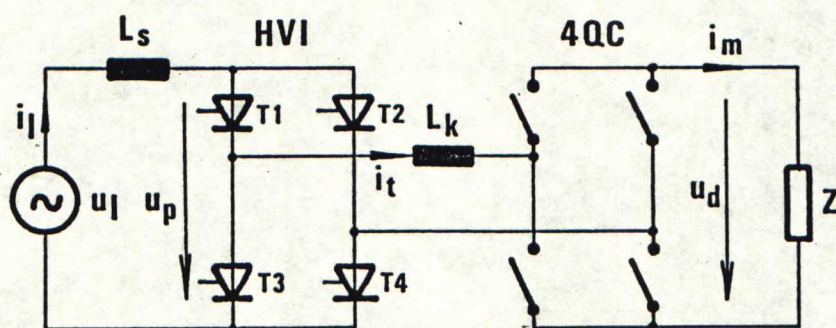


Fig 2.2 Schematisk krets för analys

Systemets funktion kan indelas i fyra delar. De olika delarna beror på vilket tillstånd fyrkvadrantställaren befinner sig i. Ett allmänt uttryck för derivatan av nätströmmen under tre av de olika tillstånden för funktionen är

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{u(t) - pknU_d}{L_k + L_s} \quad (2.2)$$

där $p = +1$ under den positiva halva perioden av nätspanningen och $p = -1$ under den negativa delen. Bokstaven n står för omsättningen.

Parametern k kan antingen vara $+1$, -1 eller 0 beroende på vilket tillstånd fyrkvadrantställaren befinner sig i. Det fjärde tillståndet är kommuteringen av högspänningsväxelriktaren.

$k = +1$

I det här tillståndet matas effekt från AC-nätet till spänningsmellanledet. Normalt är $n \cdot U_d$ alltid större än $u(t)$ vilket betyder att strömmen minskar.

$k = 0$

I detta fall är högspänningsväxelriktaren kortsluten på högfrekvenssidan. Det här uppnås genom att antingen tända de två övre eller nedre tyristorerna i fyrkvadrantställaren. Detta tillstånd används vanligen inte men kan användas i sofistikerade styrningar för att reducera övertoner i nätströmmen.

$k = -1$

I det här tillståndet är matningsspänningen och likspänningsmellanledet seriekopplade. (-1) -tillståndet uppträder alltid under återhämtningsintervallet efter kommutering av tyristorerna i högspänningsväxelriktaren.

För att erhålla den behövliga kommuteringsspänningen för högspänningsväxelriktaren måste kommuteringen alltid starta då systemet är i $(+1)$ -tillstånd. Fig 2.3 visar kommuteringsströmmen då strömmen kommuterar från tyristorerna 1 och 4 till 2 och 3 under en positiv halvperiod av nätströmmen. Derivatnan av kommuteringsströmmen är

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{U_d}{L_k} \quad (2.3)$$

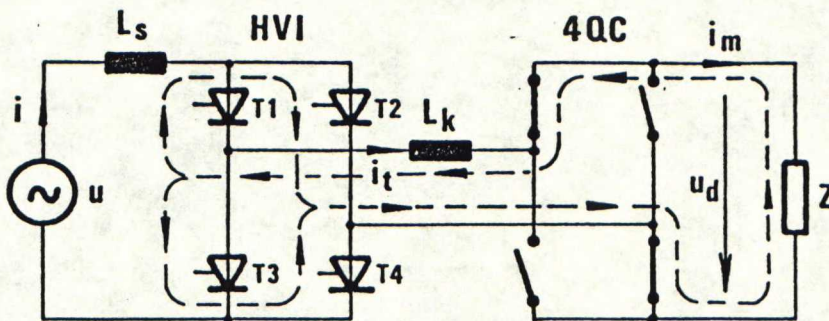


Fig 2.3 Strömmen då den kommuterar från tyristorerna 1 och 4 till tyristorerna 2 och 3

En låg läckinduktans ger en hög derivata och man uppnår en snabb kommutering. Därför är en av de viktigaste uppgifterna i detta arbete att dimensionera en transformator med en låg läckinduktans.

Under kommuteringen blir nätströmmens derivata

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{u(t)}{L_s} \quad (2.4)$$

Genom att dela upp högspänningsväxelriktaren i flera delar kan nätströmmens derivata erhålla flera tänkbara värden och därmed kan övertonerna i nätströmmen reduceras. Fig 2.4 visar kretsen då växelriktaren är uppdelad i tre omformare.

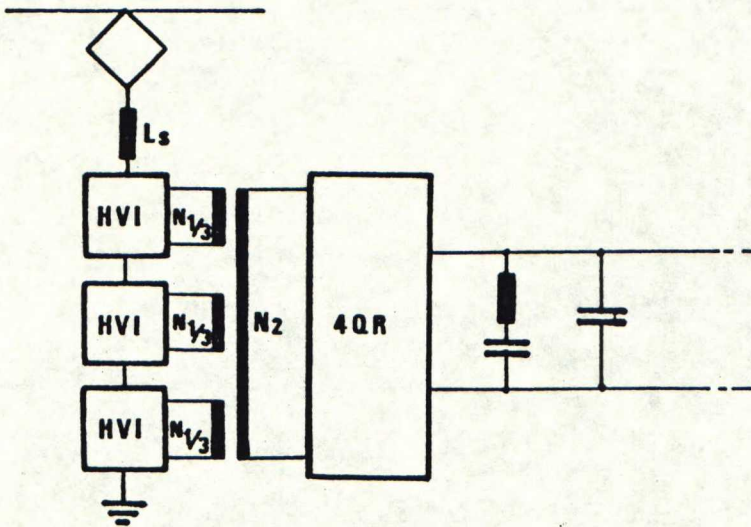


Fig 2.4 Reducering av övertoner med tre primärlindningar inkopplade.

3. Krav på transformatorn

3.1 Lindningar

Transformatorn har fyra primärlindningar. Med hjälp av tyristorbryggan styr man antingen ström genom en lindning eller förbikopplar den. Som tidigare beskrivits kan, beroende på nätspänningen, en till fyra lindningar vara inkopplade samtidigt. Den osymmetriska matningen kan ge upphov till en mycket ojämn strömfördelning i sekundärlindningarna. Man måste välja vilken eller vilka lindningar man matar så att den bästa strömfördelningen erhålls. Lindningarnas inbördes placering har stor betydelse, vilket mera ingående behandlas i kapitel 6.

3.2 Låg läckinduktans

För att erhålla en snabb kommutering av tyristorerna måste transformatorn ha en låg läckinduktans (se 2.3). I en vanlig krets i ett lok är läckinduktansen i transformatorn hög, för att minska på övertonerna i nätströmmen. I denna krets är det induktansen L_s som har till uppgift att minska på övertonerna, så att transformatorn kan ha en låg läckinduktans. Det är framför allt avståndet mellan lindningarna och lindningarnas höjd som inverkar på läckinduktansen. Långa och smala lindningar ger låg läckinduktans medan korta och breda lindningar ger hög läckinduktans.

3.3 Storlek

Transformatorn placeras ofta i liggande ställning i loket under golvet. Det ställer krav på transformatorns fönsterbredd. Om transformatorn har ett smalt kärnfönster ryms den bättre i loket. Bredden kan minskas betydligt om man placerar flera primärlindningar respektive sekundärlindningar bredvid varandra, eftersom isolationsavstånden inte behöver vara så stora mellan lindningar på samma spänning. Men detta kan leda till problem beträffande strömfördelningen. Denna fråga behandlas mera ingående i kapitel 6.

3.4 De uppställda kravens inverkan vid transformatorns dimensionering

De begränsningar som ges av de ovannämnda kraven måste beaktas vid transformatorns konstruktion och dimensionering. I kapitel 6 diskuteras olika alternativa transformatorutföranden varefter val sker av det transformatorutförande som bäst tillgodoser de uppställda kraven.

I kapitel 7 görs en dimensioneringsberäkning av det valda transformatorutförandet med hjälp av ett för ändamålet utvecklat datorprogram. För givna värden på typeffekt, tätheter, frekvens och fastlagt värde på läckinduktansen beräknas de dimensioner som ger den lägsta vikten.

Eftersom dimensionernas inverkan på induktansen måste beaktas vid beräkningar behandlas först i ett särskilt kapitel 4 läckinduktansen och dess beräkning. För att kontrollera strömfördelningen mellan sekundärlindningarna används en speciell matematisk beskrivning av flerlindningstransformatorn. Också detta redovisas i ett särskilt kapitel 5 före kapitlen om val av transformatorutförande och dimensionering.

4. Läckinduktans och dess beräkning.

Serieimpedansen Z_K , fig 4.1, i en transformator är främst reaktiv. Den resistiva komponenten representerar lindningens strömberoende förluster. De benämns ofta RI^2 -förluster i lindningen. Den resistiva komponenten är vanligtvis liten, typiskt för en transformator med märkeffekten 1 MVA är 1% av den totala serieimpedansen (Grundmark 1988).

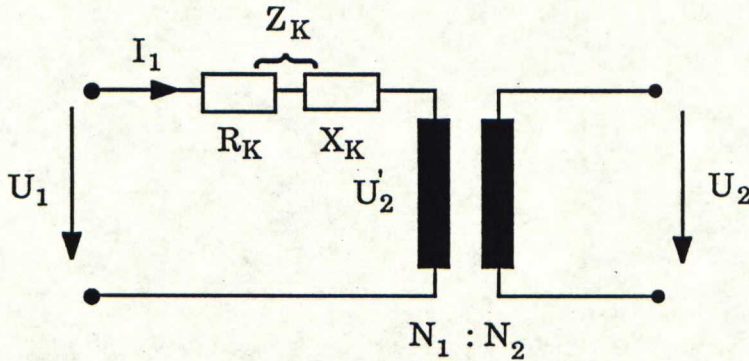


Fig 4.1 Ekvivalent schema för transformatorn, magnetiseringsimpedansen är försummad

Den induktiva delen av serieimpedansen beror på transformatorns läckfält. Läckfältet är det magnetiska flöde som inte följer järnkärnan och inte sammanlänkar transformatorlindningarna. Det starkaste läckfältet finns mellan lindningarna. Fig 4.2 visar hur läckfältet är riktat beroende på lindningarnas placering och utformning.

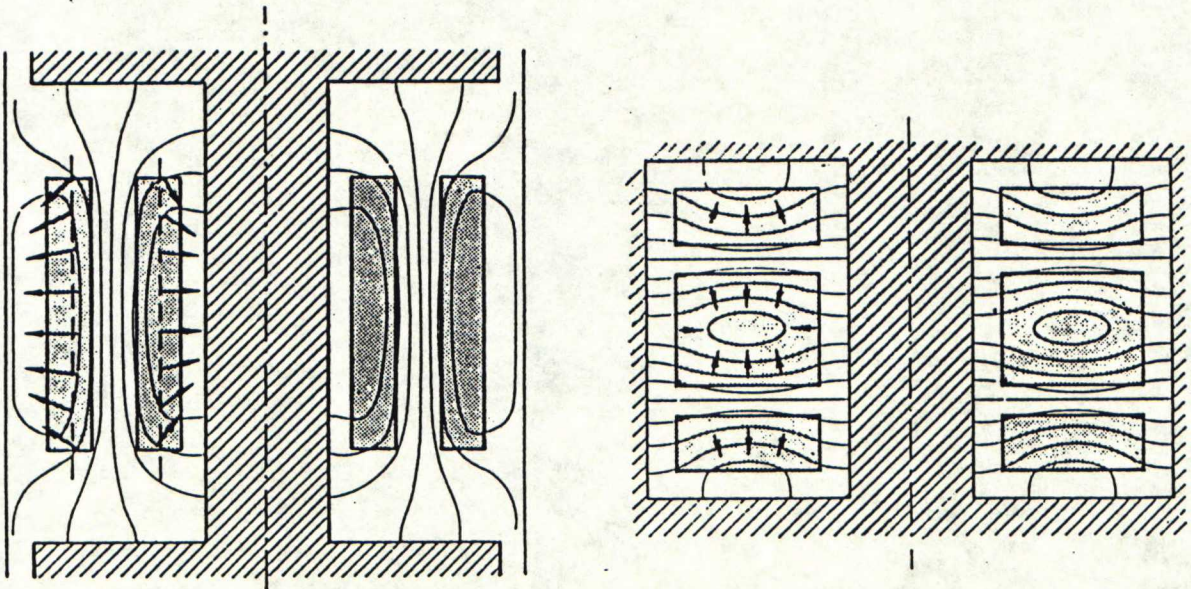


Fig 4.2 Läckfältet för två olika lindningstyper

En transformator bestående av en stor andel järn, dvs med ett litet kärnfönster, har låg induktans. Motsvarande ger en transformator med hög andel koppar en hög induktans. En transformator med långa smala lindningar, fig 4.3 högra figuren, har lägre reaktans än en med bredare och kortare lindningar, vänstra figuren.

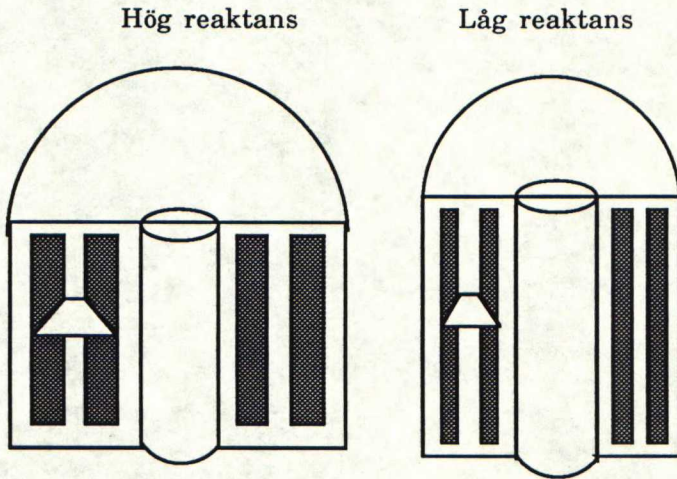


Fig 4.3 Reaktansen för olika typer av lindningar

4.1 Analytisk beräkning

Med vissa idealiseringar kan ett uttryck för läckinduktansen beräknas ur den magnetiska energin. Det har i det följande kallats analytisk beräkning. Den analytiska beräkningen har jämförts med värden erhållna från fältberäkningsprogrammet Ace (se 4.2). I härledningen nedan utgår från Carlsson (1985) och Grundmark (1988). I den analytiska beräkningen antas att det finns två lindningar i fönstret (fig 4.4) och att amperevarvsbalans råder, dvs $N_1 I_1 = N_2 I_2$. Dessutom antas att cylindersymmetri gäller. Allt material ovanför och under lindningarna förbises och det existerar ett rent axiellt fält med konstant flödestäthet längs hela höjden av lindningen. Magnetiska energin kan uttryckas på två sätt; antingen som en funktion av induktansen eller som en volymintegral av magnetiska energitätheten, för ett och samma momentanvärde på strömmen. Den magnetiska energin är

$$W = \frac{LI^2}{2} = \int \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}}{2} dV = \frac{1}{2} \mu_0 \int H^2 dV \quad (4.1)$$

H = magnetisk fältstyrka
 I = ström
 L = induktans
 W = magnetisk energi
 μ_0 = permeabilitet

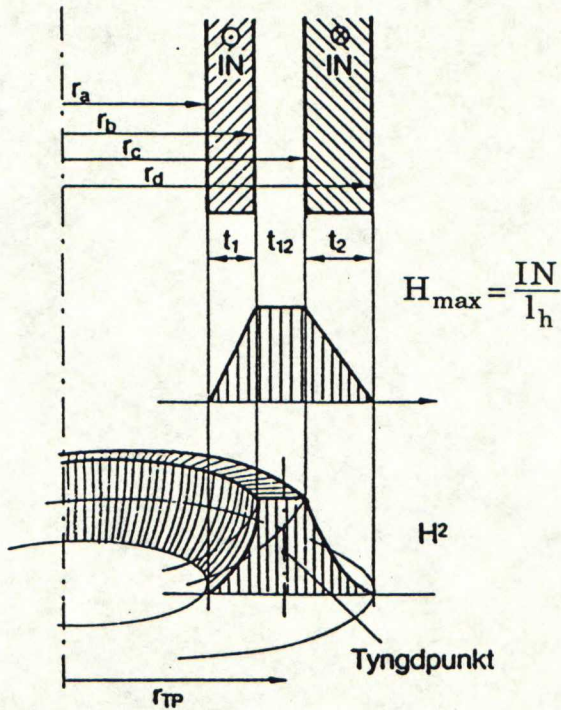


Fig 4.4 Kurva för magnetiska fältstyrkan

Från Amperes lag fås den magnetiska fältstyrkan H

$$H_{\max} = \frac{IN}{l_h} \quad (4.2)$$

l_h = lindningens höjd
 N = varvtal

Den totala energin fås som en integral av energitätheten över en cylindervolym.

$$W = \frac{1}{2} \mu_0 l_h \int H(r)^2 2\pi r dr \quad (4.3)$$

Med hjälp av Guldins regel kan integralen beräknas. Guldins regel förutsätter att man som medelradie använder radien för figurens tyngdpunkt, r_{tp} . Här används medelvärdet för lindningarnas radier. Även om lindningarnas bredd skulle vara olika ger ovannämnda medelvärde ett tillräckligt noggrant resultat. Volymen är arean multiplicerad med längden av cirkeln, som går genom tyngdpunkten på ytan. Sidorna av ytan är parabler. De bidrar till arean med $1/3$ av rektangeln som de genomskär. Därför kan (4.3) skrivas som

$$W = \frac{1}{2} \mu_0 l_h H_{\max}^2 \left(\frac{t_1}{3} + t_{12} + \frac{t_2}{3} \right) 2\pi r_{tp} \quad (4.4)$$

$$r_{tp} = \frac{r_{11} + r_{12}}{2}$$

r_{tp} = radie för tyngdpunkt
 $r_{11,2}$ = lindningarnas medelradie
 $t_{1,2}$ = lindningarnas bredd
 t_{12} = isolering mellan lindningarna

Om (4.2) insättes i (4.4) fås

$$W = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{(IN)^2}{l_h} \left(\frac{t_1}{3} + t_{12} + \frac{t_2}{3} \right) \cdot \frac{l_{11} + l_{12}}{2} \quad (4.5)$$

$l_{11,2}$ = lindningarnas medeldiameter

I ändarna av lindningarna går läckfältet inte axiellt utan viker av mot kanterna. Detta justeras med en empirisk korrektion, som brukar kallas Rogowskifaktorn (Küchler 1956). 1909 ställde Rogowski upp en ekvation för en korrigeringsfaktor:

$$K = 1 - \frac{a}{\pi l_h} \left(1 - e^{-\frac{\pi l_h}{a}} \right), \quad a = t_1 + t_{12} + t_2 \quad (4.6)$$

Villkor för att Rogowskis korrigering skall vara riktig är att

$$t_{12} < \frac{t_1 + t_{12} + t_2}{2} \quad \text{och} \quad \frac{t_1 + t_{12} + t_2}{l_h} < 2$$

Faktorn utvecklades egentligen för en blandlindning, men den används ofta för koncentrisk lindningar.

Uttrycket för läckinduktansen fås enligt (4.1) genom att dividera (4.5) med $1/2I^2$.

$$L_k = \mu_0 \frac{N^2}{l_h} \left(\frac{t_1}{3} + t_{12} + \frac{t_2}{3} \right) \cdot \frac{l_{11} + l_{12}}{2} \quad (4.7)$$

Från (4.7) ses att läckinduktansen är ungefär proportionell mot avståndet mellan lindningarna och omvänt proportionell mot höjden på lindningarna.

4.2 Beräkning med finita elementmetoden.

I det här arbetet har datorprogrammet Ace använts till beräkning av läckinduktans ur den magnetiska energin, samt för att rita flödeskurvor. Programmet fungerar enligt finita elementmetoden (FEM). Fig 4.5 visar menun i Ace.

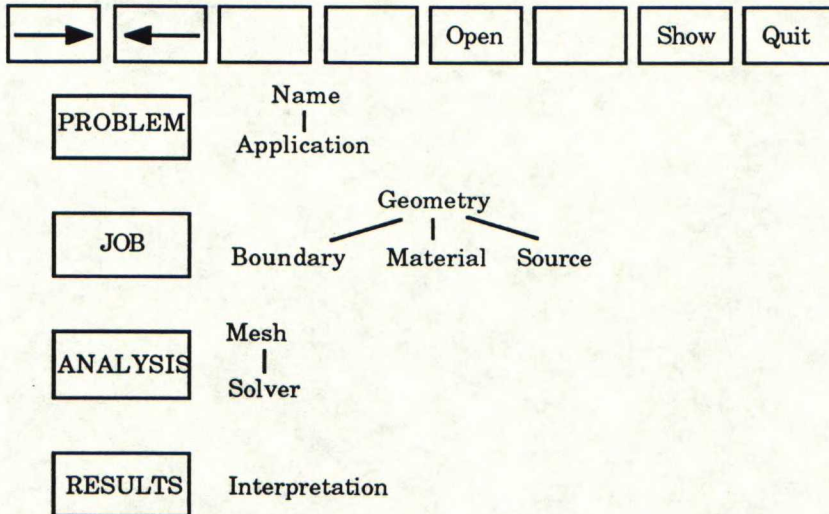


Fig 4.5 Menuval i Ace

Då ett nytt arbete påbörjas utförs rutinerna i följande ordning:

1. Transformatorn kan undersökas vid konstant ström eller växelström. Vid växelström väljs även vilken frekvens som önskas användas. Detta görs i APPLICATION. Där väljs också den önskade analysmetoden, tex termisk eller magnetisk analys.
2. I GEOMETRY ritas måtten på transformatorn. Hela transformatorn behöver inte inritas. Det räcker med ena halvan om figuren är symmetrisk. Tex i ett fall med en trebenstransformator ritas endast halva mittbenet och ett fönster in. Det här sparar beräkningstid.
3. I BOUNDARY ges ytterkanterna gränsvärden. I detta fall har vektorpotentialen = 0 använts.
4. De olika materialen definieras i MATERIAL. För en transformator behövs materialen koppar, järn, olja samt ett luftlager runt transformatorn för att se om flödet läcker utanför järnkärnan.
5. I SOURCE bestäms i vilka lindningar strömmen skall gå, samt strömmens storlek och riktning. Skineffekten kan beaktas i fallet med växelström.

6. Då alla definitioner är gjorda delas modellen in i triangulära element i MESH. Programmet gör automatiskt en grov första indelning, vilket visas fig 4.6.

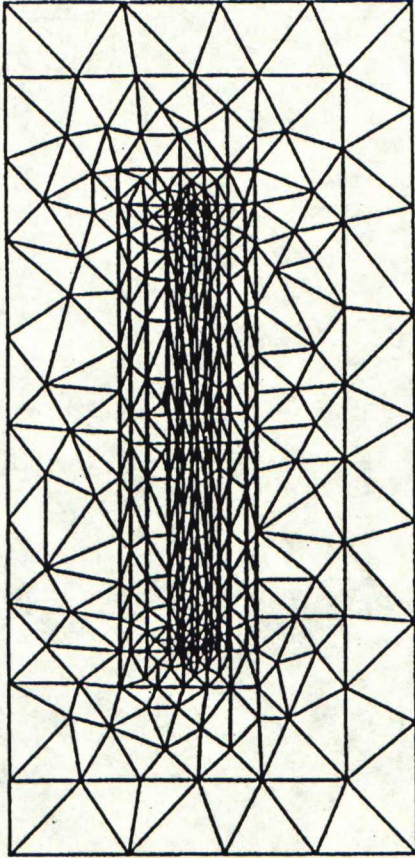


Fig 4.6 Transformatorn indelad i element

Därefter bestäms om ett tätare nätverk behövs och vid behov inplaceras extra noder (punkter). Vid dessa extra noder kan elementens storlek bestämmas.

7. Programmet utför beräkningar i SOLVER. Beräkningstiden är vanligen en till tio minuter beroende på antalet element och lösningsmetod.

8. I INTERPRETATION väljs vad som önskas studeras närmare. I detta fall har det intressantaste varit att se hur stor den magnetiska energin är och hur flödeskurvorna ser ut. Fig 4.7 visar huvudflödet i en transformator.

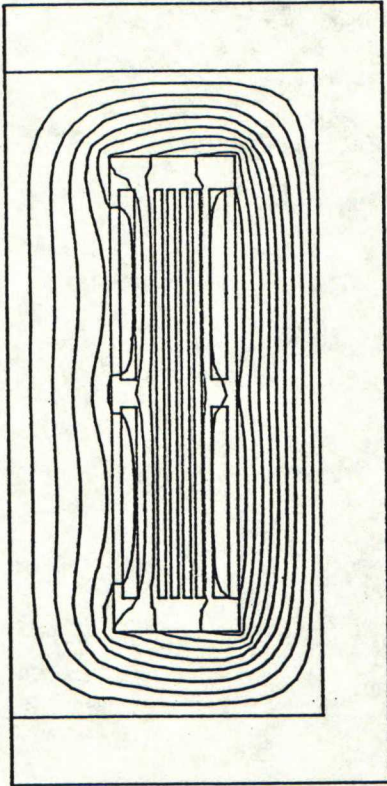


Fig 4.7 Huvudflödet i en transformator.

5. Matematisk beskrivning av flerlindningstransformatorn

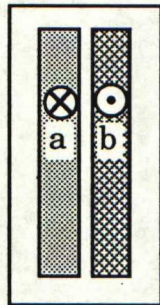
En jämn strömfördelning mellan sekundärlindningarna är ett av kraven på transformatorn. Här följer en härledning av formler, som gör det möjligt att bestämma strömfördelningen. Härledningen följer i stort sätt Grundmark (1986).

Vissa förenklingar och antaganden görs:

- Exakt amperevarvsbalans råder i fönstret, dvs kärnan har oändlig permeabilitet.
- De resistiva effekterna försummas vid sidan av de induktiva effekterna, dvs lindningarna är förlustfria.
- I stället för polspänning och ström används spänning per varv och amperevarv.
- Slutligen konstateras att läckfältets magnetiska motstånd ligger i luftsträckorna, även om större delen av läckfältet delvis sluter sig genom magnetisk material. Förhållandena är således linjära.

5.1 Tvålindnings- eller kortslutningsimpedans

Först definieras tvålindningsimpedansen. Det antas ett kärnfönstret har två lindningar, a och b. I lindning a matas strömmen I och man tar ut strömmen $-I$ i lindning b. Impedansen mellan a och b skrivs som



$$U_a - U_b = Z_{ab} I$$

$$I_a = I = -I_b$$

Om U_b sätts lika med 0, blir $U_a = Z_{ab} I$.

Z_{ab} kallas därför kortslutningsimpedans mellan a och b.

Uttrycket är symmetriskt med avseende på a och b. Ekvationerna kan omvänt skrivas som

$$U_b - U_a = Z_{ba} I$$

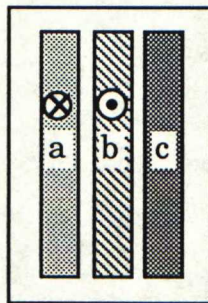
$$I_b = I = -I_a$$

Om $U_a = 0$ är $U_b = Z_{ba} I$. Tvålindningsimpedansen Z_{ba} är lika som Z_{ab} .

I det aktuella transformatorfallet finns det mera än två lindningar i fönstret. Då kan inte bara räknas med tvålindningsimpedanser. Man måste ta hänsyn till lindningarnas inbördes beroende. Detta görs genom att räkna ut trelindningsimpedanser utgående från tvålindningsimpedanserna.

5.2 Trelindnings- eller kortslutningsömsimpedans

Det antas att det finns tre lindningar i fönstret, a, b, och c. Strömmen I matas in i a och strömmen $-I$ tas ut från b, så att amperevarvsbalansen bibehålles. Lindning c:s spänning studeras.



$$U_c - U_b = Z_{cab} I$$

$$I_c = 0, I_a = -I_b = I$$

Om $U_b = 0$, så kommer spänningen i c att bli $U_c = Z_{cab} I$.

Z_{cab} kallas kortslutningsömsimpedans. De tre olika indexen är följande:

1. Lindning vars spänning studeras
2. Strömförande lindning
3. Spänningsreferens och returströmslindning

Tvålindningsimpedansen kan skrivas med tre index, Z_{ab} är samma som Z_{aab} eller Z_{bba} .

Nedan följer en härledning av trelindningsimpedansen utgående från tvålindningsimpedansen. Impedanserna uttrycks med hjälp av spänning och ström.

$$\frac{U_a - U_b}{I} = Z_{ab} = Z_{aab} = Z_{bba} \quad (5.1)$$

$$\frac{U_c - U_b}{I} = Z_{cab} = Z_{acb} \quad (5.2)$$

$$\frac{U_c - U_a}{I} = -Z_{cba} = -Z_{bca} \quad (5.3)$$

$U_a - U_b$ i (5.1) skrivs som

$$U_a - U_b = U_a - U_b + U_c - U_c = (U_c - U_b) - (U_c - U_a) \quad (5.4)$$

Tvålindningsimpedanserna uttrycks med hjälp av trelindningsimpedanserna. I (5.4) ersätts spänningsdifferenserna med kortslutningsömsimpedanserna ur (5.1-5.3). Strömmen förkortas bort. Ekvationen får följande form:

$$Z_{aab} = Z_{cab} + Z_{cba} \quad (= Z_{bba} = Z_{acb} + Z_{bca})$$

Sambandet upprepas två gånger till för de övriga kombinationerna. De tre ekvationerna är

$$Z_{aab} = Z_{cab} + Z_{cba}$$

$$Z_{bbc} = Z_{abc} + Z_{acb}$$

$$Z_{cca} = Z_{bca} + Z_{bac}$$

Från ekvationerna ovan löses Z_{abc} , Z_{bca} och Z_{cab} .

$$Z_{abc} = \frac{Z_{cca} + Z_{bbc} - Z_{aab}}{2} \quad (5.5)$$

$$Z_{bca} = \frac{Z_{aab} + Z_{cca} - Z_{bbc}}{2} \quad (5.6)$$

$$Z_{cab} = \frac{Z_{bbc} + Z_{aab} - Z_{cca}}{2} \quad (5.7)$$

5.3 Ett godtyckligt antal lindningar

Man kan öka antalet lindningar till ett godtyckligt antal $(n+1)$. En av lindningarna tjänar som spänningsreferens, den får indexet $(n+1)$. I de övriga lindningarna flyter fritt valda strömmar. Strömmen i referenslindningen fås från amperevarvsbalansen:

$$I_{(n+1)} = - \sum I_k \quad (5.8)$$

Ett ekvationssystem med n st linjära ekvationer byggs upp med hjälp av trelindningsimpedanserna. Z betyder $j\omega L$ vid stationärt fall och operatorimpedans vid transient fall.

$$\begin{bmatrix} Z_{11(n+1)} & Z_{12(n+1)} & \dots & Z_{1n(n+1)} \\ Z_{21(n+1)} & \dots & & \\ \vdots & & \ddots & \\ Z_{n1(n+1)} & \dots & \dots & Z_{nn(n+1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 N_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ I_n N_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 - U_{(n+1)} \\ \vdots \\ \vdots \\ U_n - U_{(n+1)} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Z-matrisen är som tidigare nämnts symmetrisk, dvs $Z_{pq(n+1)} = Z_{qp(n+1)}$.

5.4 Tillämpning av impedansmatrisen.

Här följer ett exempel på hur impedansmatrisen har utnyttjats i det aktuella fallet med fyra primär- och fyra sekundärlindningar. Med hjälp av metoden ovan kan strömfördelningen i sekundärlindningarna beräknas.

I det första skedet av beräkningen används Ace. Transformatorgeometrin matas in. De fyra seriekopplade primärlindningarna ges index 1, 2, 3 och 4 och sekundärlindningarna index 5, 6, 7 och 8 enligt fig 5.1. Lindningarnas placering är i detta exempel godtycklig och har inget samband med den valda transformatormodellen.

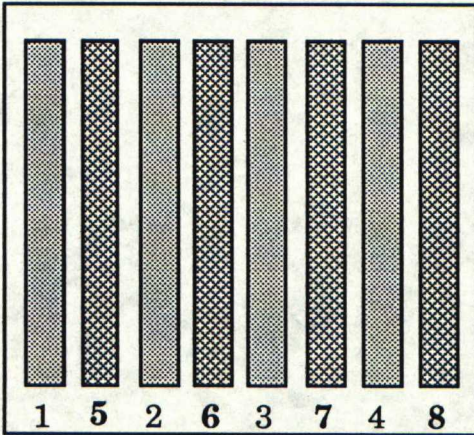


Fig 5.1 Numrering av lindningarna

Lindning 8 fungerar som referenslindning. Primärströmmarna I_1 , I_2 , I_3 och I_4 är kända. Lindningen matas antingen med ström eller så förbikopplas den. Tvålindningsimpedansen mellan två lindningar beräknas genom att mata den ena med ström och ta ut strömmen från den andra lindningen, så att amperevarvsbalans råder.

Ace ger värdet på den magnetiska energi, som då lagras. Utgående från magnetiska energin beräknas sedan tvålindningsimpedanserna genom att dividera energivärdet med $1/2 I^2$.

Trelindningsimpedanserna beräknas från tvålindningsimpedanserna. Ett undantag utgör diagonalelementen i impedansmatrisen. De är endast beroende av två lindningar och är alltså direkt lika med tvålindningsimpedanserna. Ett ekvationssystem enligt (5.9) uppställs.

$$\begin{bmatrix} Z_{118} & Z_{128} & \dots & Z_{178} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{718} & \dots & \dots & Z_{778} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 N_1 \\ \dots \\ \dots \\ I_7 N_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 - U_8 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Eftersom sekundärlindningarna är sinsemellan kortslutna är spänningen mellan dem och lindning 8 lika med 0, tex $U_5 - U_8 = 0$. Med totalt 8 lindningar får matrisen 7 ekvationer.

De okända strömmarna I_5 , I_6 och I_7 skall lösas ut. Tre ekvationer behövs. Ekvationssystemet får följande form:

$$\begin{bmatrix} Z_{558} & Z_{568} & Z_{578} \\ Z_{658} & Z_{668} & Z_{678} \\ Z_{758} & Z_{768} & Z_{778} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_5 N_5 \\ I_6 N_6 \\ I_7 N_7 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{518} & Z_{528} & Z_{538} & Z_{548} \\ Z_{618} & Z_{628} & Z_{638} & Z_{648} \\ Z_{718} & Z_{728} & Z_{738} & Z_{748} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 N_1 \\ I_2 N_2 \\ I_3 N_3 \\ I_4 N_4 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

I detta fall är $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = N_p$ och $N_5 = N_6 = N_7 = N_8 = N_s$. Då strömmarna lösts ut från ekvationerna erhålls referenslindningens ström I_8 från följande ekvation enligt (5.8):

$$I_8 = -((I_1 + I_2 + I_3 + I_4) * N_p / N_s) + I_5 + I_6 + I_7$$

6. Utvärdering av tänkbara alternativ

För att klargöra grundbegreppen följer först en kort redogörelse för några olika kärn- och lindningstyper. Därefter presenteras några tänkbara modeller, som granskas utgående från kriterierna i kapitel 3.

6.1 Kärn- och lindningstyper

Transformatorerna indelas i två huvudgrupper. Man skiljer mellan transformator av kärntyp och manteltyp. I kärntypen omsluts järnkärnan av en lindning och i manteltypen är det lindningarna som omsluts av en järnmantel.

Manteltransformatorn har ett rektangulärt (inte kvadratisk) kärntvårsnitt. Kärntransformatorn har vanligen ett runt kärnben. Kärntypen har en stående lindningsaxel och manteltypen har en liggande axel. Undantag förekommer dock allmänt, så några klara gränser kan inte dras mellan de olika typerna. Fig 6.1 visar de olika typerna.

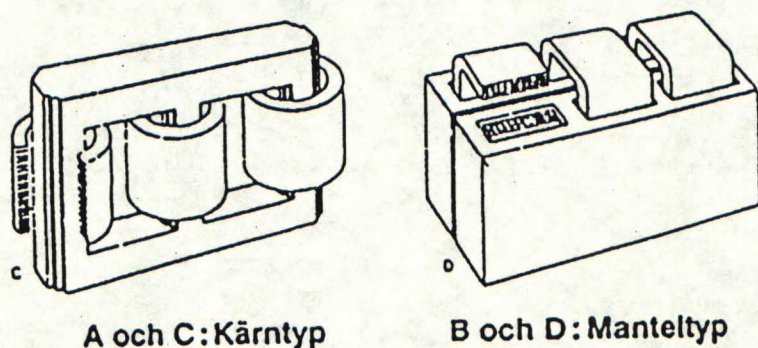


Fig 6.1 Kärntransformator och manteltransformator

Även lindningarna kan indelas i två olika huvudtyper, skivlindning och lagerlindning. Kärntypen har ofta lagerlindning medan manteltypen har skivlindning. Även andra typer av lindningar finns, tex skruvlindning och cylinderlindning. Dessa typer behandlas inte i detta sammanhang.

Lagerlindning och blandlindning

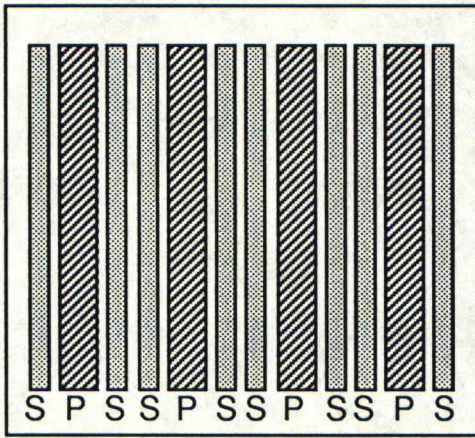
En lagerlindning har koncentriskt lindningar runt kärnbenet. En blandlindning, som är en slags skivlindning, har primära och sekundära lindningspaket omväxlande i axiell led. Hos en blandlindning kommer läckfältet i huvudsak att vara radiellt mellan primära och sekundära grupper. Fönstrets geometri är sådan att läckfältsvägen på detta sätt blir relativt kortare än hos en typisk kärntransformator. I manteltypen görs ofta en uppdelning av primär- och sekundärlindningarna i flera grupper, vilket medför att läckfältet och därmed läckreaktansen begränsas.

En noggrann beräkning av reaktansen hos manteltypen, är inte så enkel som hos kärntypen, där rotationssymmetrin är väl utbildad. De mekaniska krafterna mellan lindningarna vid överström blir helt olika, på grund av lindningarnas olika orientering. De koncentriskt lindningarna blir i första hand utsatt för radiella krafter utefter benets längd, och i andra hand axiella krafter i partierna vid ändarna, vilka bygger upp ett axiellt tryck. I ett blandlindningspaket kommer den huvudsakliga kraften mellan primära och sekundära lindningar att vara axiell, enligt fig 4.2. Genom uppdelningen på flera grupper kommer krafter mellan inre paket att delvis ta ut varandra, men det kvarstår alltid en kraft på de yttersta paketen.

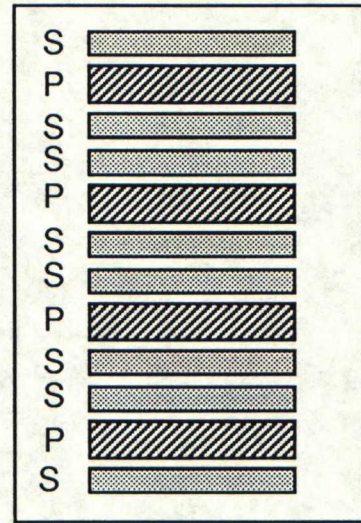
6.2 Några grundmodeller

Några modeller som var aktuella i början av arbetet studerades med Ace. Dessa undersöktes enligt kriterierna i kapitel 3.

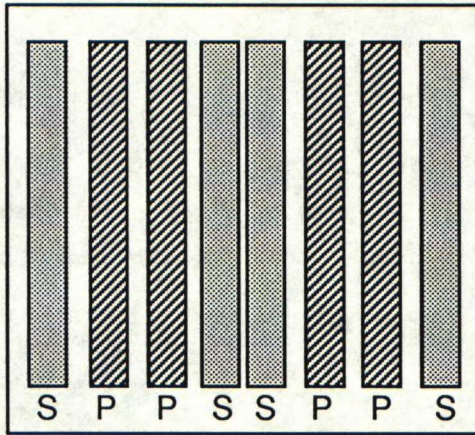
Fig 6.3 visar halva tvärsnittet av tre olika transformatormodeller. I modell 6.3.a har sekundärlindningarna uppdelats kring varje primärlindning. De smala lindningarna ger låg induktans. Modell b är en blandlindning, där lindningarna är uppdelade i axiellt led. I den sista modellen, c, är primär- och sekundärlindningarna grupperade två och två för att minska isolationsbredden. Lindningar på samma spänning som ligger intill varandra kräver kortare isolationsavstånd. Sekundärlindningarna är parallellkopplade och primärlindningarna är seriekopplade.



a)



b)



c)

Fig 6.3 Tvärsnitt av olika lindningsmodeller

Läckinduktansen beräknades både analytiskt och med Ace. Resultaten stämde väl överens med varandra. Den analytiska beräkningen ger ett ca 10% för högt värde. Det beror på att Rogowskis korrektion inte alltid kan användas, eftersom villkoren inte är uppfyllda. Avstånden mellan lindningarna är för stora. Tabell 6.1 visar en jämförelse mellan analytisk beräkning och beräkning där Rogowskis korrektion har beaktats samt beräkning med Ace. Den beräknade transformatormodellen är fig 6.3.a. Lindningarna 1 till 4 är primärlindningar och 5 till 8 representerar ett sekundärlindningspar.

Lindning	Analytiskt	Rogowski	Ace [Ws]
1-2	56.4	54.1	50.5
1-3	132.7	122.9	118.4
1-4	225.2	201.3	199.8
1-5	18.1	17.7	16.1
1-6	20.6	20.2	18.2
1-7	30.1	29.3	27.1
1-8	87.6	83.1	79.1

Tabell 6.1 Magnetiska energin beräknad analytiskt, med Rogowskifaktorn samt med Ace

Modell a förkastades eftersom isolationen skulle ta för mycket plats. Dessutom kunde lindningen bli svår att utföra i praktiken. Modellen med blandlindningen var inte heller lämplig. Det blir problem med strömfördelningen mellan sekundärlindningarna och isolationen skulle ta alldeles för stor plats.

Det återstod endast en modell, men den bedömdes inte heller vara tillräckligt bra. Då utarbetades en ny modell med alla primärlindningarna i mitten och två sekundärlindningar på var sida om primärlindningarna (fig 6.4).

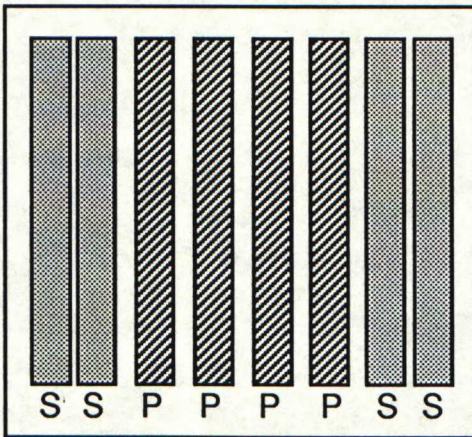


Fig 6.4 Lindningsmodell med fyra primärlindningar bredvid varandra

För denna modell utfördes en analytisk beräkning och ekvationerna för sekundärströmmarna ställdes upp enligt (5.10). För primärlindningarna har varvtalet 82 och strömmen 322 A använts. Sekundärlindningarnas varvantal är 32. Ekvationssystemet visade sig vara olösligt.

$$\begin{bmatrix} 0,00159 & 0,00148 & 0,000187 \\ 0,00148 & 0,00146 & 0,000187 \\ 0,000187 & 0,000187 & 0,000159 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -95.06 \\ -95.06 \\ -19.77 \end{bmatrix}$$

Fig 6.5 Ekvationssystem för transformator i fig 6.4

De två översta ekvationerna har lika högerled i fig 6.5, men i det vänstra ledet skiljer endast element (1,1) och (2,2). Det matematiska problemet har även en fysikalisk tolkning. Den sekundärlindning som ligger närmast den matande primärlindningen skärmar av den sekundärlindning som ligger längre bort. Den närliggande tar hela strömmen. I det här fallet är primärlindningarna seriekopplade och sekundärlindningarna parallellkopplade, vilket ställer höga krav på den sekundära strömfördelningen.

6.3 Den slutliga modellen

Placeringen av sekundärlindningarna måste ändras. En axiell delning (eng. axial split) gjordes i stället. Sekundärlindningen delades på längden så att det blev två bredare lindningar *på* varandra istället för två smala bredvid varandra. De negativa effekterna av två sekundärlindningar bredvid varandra kunde helt undvikas och en fungerande modell hade utarbetats (fig 6.6).

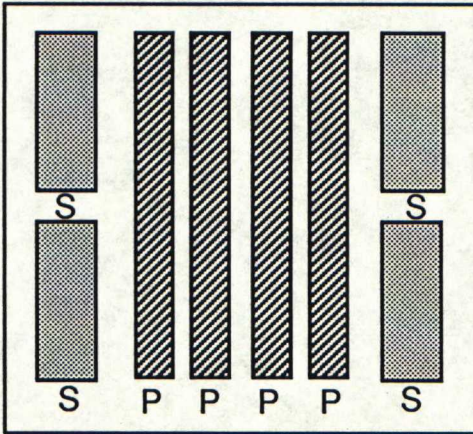


Fig 6.6 Lindningsmodell med axiell delning

Modellen har en tillräckligt låg läckinduktans. Den ojämna strömfördelningen i sekundärlindningarna, tabell 6.2, beror på skillnaden i medelradien för lindningarna. Genom att öka avståndet mellan sekundärlindningarna närmast mittbenet och den närliggande primärlindningen kan strömfördelningen fås ännu jämnare. Tabell 6.2 visar fördelningen *innan* förbättringarna gjorts. Primärlindningarna matas med 333 A och tabellen visar fyra fall, med olika antal primärlindningar inkopplade.

I_1	I_2	I_3	I_4	I_5 / I_6	I_7 / I_8 [A]
0	0	333	0	-205	-222
0	333	333	0	-482	-372
0	333	333	333	-607	-673
333	333	333	333	-925	-725

Tabell 6.2 Strömfördelning i sekundärlindningarna beroende på antalet inkopplade primärlindningar.

Då alla primärlindningar är inkopplade är strömmen i de inre sekundärlindningarna 925 A och i de två yttre 725 A, dvs de inre får 56% av strömmen och de yttre 44%.

6.4 Alternativ tvåbenstransformator

I denna studie har en trebenstransformator dimensionerats. Men en tvåbensmodell kunde också ha varit aktuell. I trebensfallet blir det problem med att placera lindningar för hjälpkraft och tågvärme, vilka normalt behövs i elektriska traktionsfordon. De ryms inte i kärnfönstret. I det fall att endast två sekundärlindningar behövs, kunde hjälplindningarna vid lägre effekt placeras på de två övriga sekundärlindningarnas plats. Med fyra lindningar kunde en tvåbenskärna vara en lösning. Då placeras två sekundärlindningar på vardera benet. De fyra primärlindningarna har alla delats i två parallellkopplade delar, en på vardera benet.

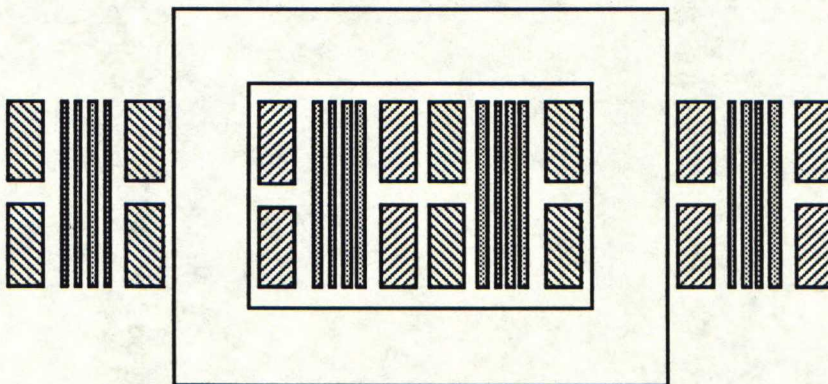


Fig 6.7 Tvåbenskärna

7. Dimenisionering av vald transformator

En transformator med axiell delning på sekundärlindningarna har valts för vidare studium. En transformator som uppfyller kraven i kapitel 3 dimensioneras. Först redogörs för transformatorns typeffekt. Kärnans och lindningarnas storlek beräknas i 7.2. Strömfördelningen i sekundärlindningarna behandlas i 7.3. En jämn strömfördelning uppnås genom att öka avståndet mellan de inre lindningarna. I 7.4 behandlas lindningssförluster och i 7.5 presenteras ett exempel på en traktions-transformator samt simuleringsresultat.

7.1 Loktransformatorns typeffekt

Den inducerade spänningen E för en rektangulär kurvform är

$$E = 4 \hat{B} A_k N f \quad (7.1)$$

A_k = nettokärnarea

N = varvtal

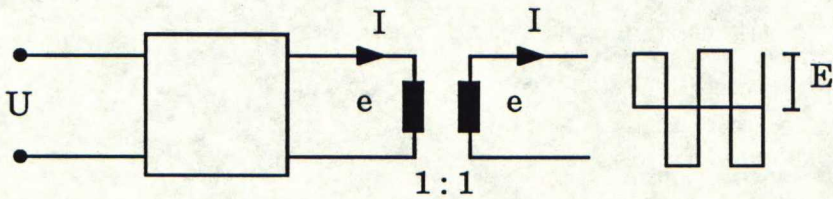


Fig 7.1 Schematisk bild av kretsen för beräkning av transformatorns typeffekt

För att kunna styra kretsen så att en sinusformad ström erhålles måste E överstiga \hat{U} med en viss marginal, $E = k\hat{U}$. Parametern k är given bla av återhämtningstiden hos tyristorerna i högspänningsväxelriktaren och kommuteringstiden för högspänningsbryggan. Då typeffekten för transformatorn är

$$S_{\text{typ}} = 4.44 \hat{B} A_k N f I \quad (7.2)$$

blir i detta fall

$$S_{\text{typ}} = 1.11 E I \quad (7.3)$$

Strömmen I ligger i fas med U , dvs $\cos\phi = 1$. Genomgångseffekten P_g ($= S_g$) blir då

$$P_g = U I \quad (7.4)$$

Typeffekten S_{typ} kan då skrivas som

$$S_{\text{typ}} = 1.11 E I = 1.11 k \sqrt{2} U I = 1.11 k \sqrt{2} S_g \quad (7.5)$$

Dvs transformatorns typeffekt är avsevärt större än systemets genomgångseffekt.

7.2 Kärna och lindningar

Till kärna väljs en trebenstyp. Det mittersta benet är runt, medan oket och de övriga benen är rektangulära, vilket visas i fig 7.2. Okets och sidobenens area är hälften av mittbenets area. Då djupet på transformatorn är lika med mittbenets diameter eller 2 gånger radien r , är bredden på sidoben och oket

$$x = \frac{\pi r}{4}.$$

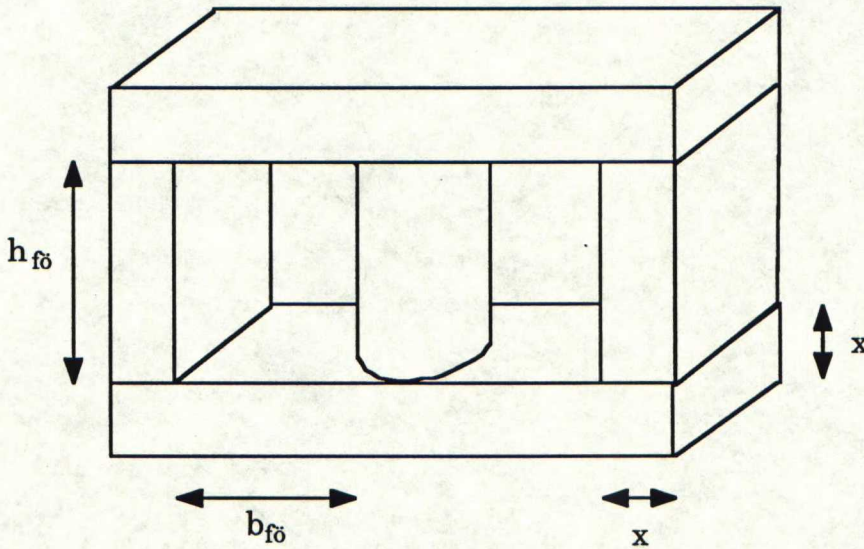


Fig.7.2 Modell av kärnan

Det mittersta benets netto järnarea A_k är

$$A_k = \pi r^2 \eta_k \quad (7.6)$$

r = kärnradie

η_k = kärnans fyllfaktor

Lindningen är belägen runt mittbenet. Dess netto koppararea A_l är höjden gånger bredden multiplicerat med lindningens fyllfaktor.

$$A_l = b_{fö} h_{fö} \eta_l \quad (7.7)$$

$b_{fö}$ = kärnfönstrets bredd

$h_{fö}$ = kärnfönstrets höjd

η_l = lindningens fyllfaktor

Järnvolymen av kärnan V_k är

$$V_k = 2 A_k (h_{fö} + \pi r/4 + r + b_{fö}) \quad (7.8)$$

Volymen av lindningskopporn V_l räknas genom att multiplicera lindningsarean med fönstrets medeldiameter.

$$V_l = A_l 2\pi (r + \frac{b_{fö}}{2}) \quad (7.9)$$

Strömmen I är

$$I = \frac{A_l j}{8 N} \quad (7.10)$$

och i detta fall är E

$$E = 4 A_k \widehat{B} f 4 N \quad (7.11)$$

där $4N$ är primärlindningarnas totala varvtal och $8N$ är alla lindningars totala varvtal. Här antas att primär- och sekundärlindningarna har lika många varv för att göra uttrycket för effekten S_{typ} enklare. Genom att kombinera (7.3), (7.10) och (7.11) fås

$$S_{typ} = 2.22 A_k A_l B f j \quad (7.12)$$

Genom insättning av uttrycket för arean hos kärnan, (7.6), kan radien r lösas ut. Eftersom arean A_l är okänd kan den elimineras från (7.12) genom att insätta uttrycket för strömtätheten j :

$$j = \frac{8 N I}{A_l}$$

Radien r fås ur

$$r = \sqrt{\frac{S}{17.76 N \pi f \eta_k \widehat{B} I}} \quad (7.13)$$

Respektive lindnings tvärsnittsarea A_{cu} fås från förhållandet mellan ström och strömtäthet i lindningarna.

$$A_{cu} = \frac{N I}{j}$$

Den nödvändiga isoleringen mellan lindningarna visas i tabell 7.1. (Malmberg 1989). Mellan lindningar på samma spänning behövs kortare isolationsavstånd, vilket är en av anledningarna till att transformatorn har fyra primärlindningar bredvid varandra. Mellan lindningar och ok behövs 50 mm för primärlindningar och 40 mm för sekundärlindningar. För att göra det enklare används avståndet 50 mm även för sekundärlindningarna. Mellan de axiellt delade sekundärlindningarna krävs 40 mm.

	Avstånd [mm]
sekundär-sekundär	3
primär-primär	8
primär-sekundär	15
primär-ok	50
sekundär-ok	40

Tabell 7.1 Isoleringsavstånd mellan lindningar

Mellan ben och lindning krävs 15 mm. Då minimiavstånden mellan lindningarna och den nödvändiga lindningsarean är kända kan lindningarnas höjd beräknas. Höjden väljs så att den önskade läckinduktansen erhålls. För att finna den rätta lindningshöjden har ett datorprogram utvecklats. I korthet kan det beskrivas på följande sätt.

1. Värden för strömtäthet, typeffekt, frekvens, spänning, omsättning och läckinduktans inmatas i programmet.

2. Kärnradien beräknas av programmet.

3. För olika värden på lindningshöjden räknar programmet ut den behövliga bredden på lindningarna. Programmet använder en omarbetad version av ekvation (4.7). Även det extra lindningsavståndet z (se avsnitt 7.3) som används för att de bättre strömfördelning tas med i beräkningarna.

Omskrivning av (4.7) ger med beteckningar enligt fig 7.3 följande:

$$\frac{L_k l_h}{\pi^2 \mu_0 8N^2} = \left(\frac{2x_1 + 4x_2}{3} + 2t_1 + 3t_2 + z \right) \cdot \left(r + \frac{2x_1 + 4x_2 + 4t_1 + 3t_2 + z}{2} \right) \quad (7.14)$$

Vänster- och högerled jämförs i (7.14) jämförs. De värden på lindningshöjd och -bredd, som uppfyller (7.14) ger den rätta storleken på lindningarna och fönsterstorleken kan beräknas. Isoleringen mellan lindningarna är alltid den minsta möjliga, förutom för det specialfall som behandlas i 7.3.

7.3 Strömfördelning mellan lindningarna.

Sekundärlindningarna får inte lika stor ström i denna transformator. De lindningar som är närmare kärnbenet får en större ström. Den skillnaden kan utjämnas genom att avståndet ökas mellan de innersta sekundärlindningarna och den innersta primärlindningen. Bredden på den extra isoleringen kan beräknas enligt följande metod (Gustavsson 1989). Fig 7.3 visar beteckningarna, som används för de olika radiella avstånden.

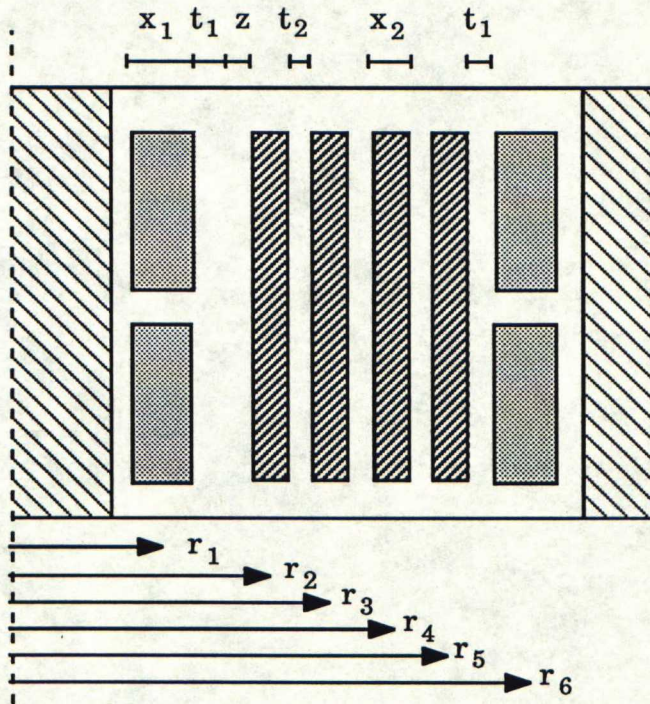


Fig 7.3 Tvärsnitt av transformatorn med lindningsbredd, isolationsbredd och radier

r_1 - r_6 = lindningarnas radier

- t_1 = isolering mellan primär- och sekundärlindning samt mellan ben och lindning
- t_2 = isolering mellan primärlindningar
- x_1 = sekundärlindningens bredd
- x_2 = primärlindningens bredd
- z = extra isolering för jämnare strömfördelning mellan sekundärlindningarna

Fig 7.4 visar mmk-kurvan i transformatorn ovan. För att erhålla en enklare ekvation räknas enbart med rektanglar, dvs lindningarna antas vara oändligt tunna, och sekundärlindningarnas axiella delning beaktas ej.

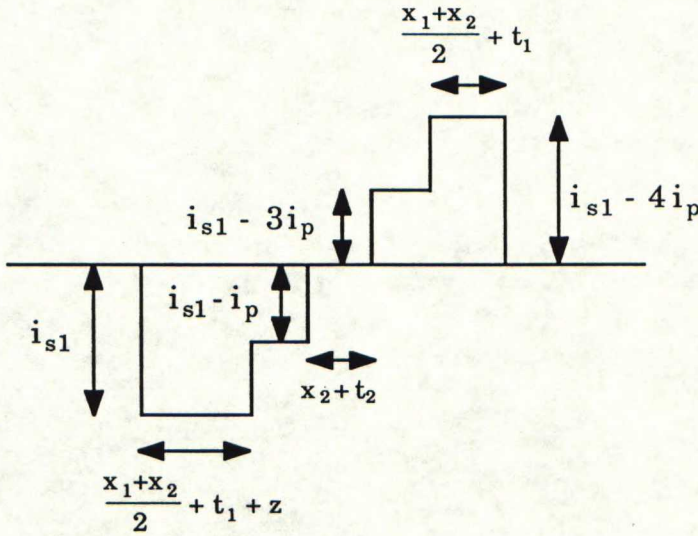


Fig 7.4 Mmk-kurva för lindningarna

Om sekundärlindningarna antas vara kortslutna och primärlindningarna matas med strömmen i_p erhålls axiella läckflöden mellan lindningarna, vilka är proportionella mot respektive mmk och mot respektive area mellan lindningarna. Summan av dessa läckflöden måste vara lika med noll eftersom det totala läckflödet som är sammanlänkat med den inre kortslutna lindningen måste vara lika med noll och det totala läckflödet som är sammanlänkat med den yttre kortslutna lindningen också måste vara lika med noll. Detta ger med beteckningar enligt nedan och enligt fig 7.4 följande ekvation.

$$\begin{aligned}
 & i_{s1} \left(\frac{l_1 + l_2}{2} \right) \left(\frac{x_1}{2} + t_1 + \frac{x_2}{2} + z \right) + (i_{s1} - i_p) \left(\frac{l_2 + l_3}{2} \right) (x_2 + t_2) + \\
 & (i_{s1} - 2i_p) \left(\frac{l_3 + l_4}{2} \right) (x_2 + t_2) + (i_{s1} - 3i_p) \left(\frac{l_4 + l_5}{2} \right) (x_2 + t_2) + \\
 & (i_{s1} - 4i_p) \left(\frac{l_5 + l_6}{2} \right) \left(\frac{x_1}{2} + t_1 + \frac{x_2}{2} \right) = 0
 \end{aligned} \tag{7.15}$$

i_p = strömmen i en primärlindning
 i_{s1} = strömmen i de båda inre sekundärlindningarna
 i_{s2} = strömmen i de båda yttre sekundärlindningarna
 $l_1 - l_6$ = lindningarnas omkrets = $2\pi r$

För att amperevarvsbalansen skall gälla måste

$$i_{s1} + i_{s2} = 4i_p$$

Då strömmen är lika i alla sekundärlindningar är

$$i_{s1} = i_{s2} \text{ och då måste } i_{s1} = 2i_p$$

Uttrycket för den behövliga extra isolationen fås genom att lösa ut z från (7.15). Om $i_{s1} = 2i_p$ insättes kan i_p förkortas bort och uttrycket blir oberoende av strömmen. Omkretsen l har förkortats med 2π och radien r kvarstår.

$$z = \left(\frac{1}{r_1 + r_2} \right) \left[(r_5 + r_6) \left(\frac{x_1 + x_2}{2} + t_1 \right) + \left(\frac{r_5 + r_4 - r_3 - r_2}{2} \right) (x_2 + t_2) \right] - \frac{x_1 + x_2}{2} - t_1 \quad (7.16)$$

I den första beräkningen är uttrycket för z är inte helt korrekt eftersom radierna r_2 - r_6 är beroende av z 's värde. Felet kan elimineras genom att upprepa beräkningen, då ett första värde på z erhållits.

7.4 Lindningsförluster

Förlusterna i en transformatorlindning består av de ohmska förlusterna och av de av läckflöden i lindningarna orsakade tillsatsförlusterna, virvelströmsförlusterna. Lindningsförlusterna P_v kan skrivas (Küchler 1956) som

$$P_v = P_{dc} \left(\frac{R_v}{R_{dc}} - 1 \right) \quad (7.17)$$

där

$$P_{dc} = \frac{\rho j^2 M}{\gamma} \quad (7.18)$$

är de ohmska förlusterna

- M = vikt
- P_{dc} = förluster vid likström
- P_v = virvelströmsförluster
- R_{dc} = resistans vid likström
- R_v = resistans vid växelström
- ρ = ledarens resistivitet
- γ = densitet

För lindningen i fig 7.5 har uttrycket för R_v/R_{dc} härletts.

$$\frac{R_v}{R_{dc}} = \frac{n^2 - 0.2}{9} \xi^4 + 1 \quad (7.19)$$

där

$$\xi = 2\pi \frac{\beta}{[m]} \sqrt{\frac{m \frac{\alpha}{[mm]}}{\frac{h}{[mm]}} K \frac{\frac{f}{[Hz]}}{10 \frac{\rho}{[\Omega mm^2/m]}}} \quad (7.20)$$

- f = frekvens
- h = lindningshöjd
- K = Rogowskifaktorn
- m = antalet ledare i axiell riktning
- n = antalet ledare i radiell riktning
- α = ledarhöjd
- β = ledarbredd

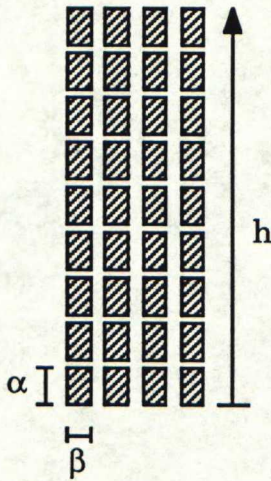


Fig 7.5 Lindning med $m = 9$ och $n = 4$

I den dimensionerade transformatorn (se 7.5) har lindningen betraktats som en enda stor ledare. På grund av virvelströmmarna är det nödvändigt att dela in lindningen i flera parallella parter. Utgående från (7.19) kan tillsatsförlusterna beräknas och det är möjligt att beräkna hur många parallella parter, som lindningen bör indelas i. Tabell 7.2 visar förhållandet mellan R_v/R_{dc} vid 200, 600 och 1000 Hz. Den tredje och femte övertonen uppträder vid 600 respektive 1000 Hz. Värdena är beräknade för en primärlindning med tjockleken 13 mm. K och $m\alpha/h$ antas vara 1 och $\rho = 0.0175 \Omega mm^2/m$.

n	200	600	1000 Hz
1	6.17		
2	2.53		
3	1.70		
4	1.40		
5	1.26		
6	1.18		
7	1.13		
8	1.10		
9	1.08		
10	1.06	1.58	2.61
20	1.02	1.14	1.40

Tabell 7.2 R_v/R_{dc} vid varierande antal lindningar och olika frekvens

Fig 7.6 visar övertonernas storlek relativt grundtonen i transformatorströmmen. Den totala ökningen av tillsatsförluster kan beräknas genom att summera ihop de olika övertonernas andel. Effekten är proportionell mot strömmen i kvadrat, $P = RI^2$. Följande exempel visar totalförlusterna beräknade från fig 7.6.

Exempel:

$$n = 20$$

$$P_{\text{tot}} = (1.02 + (0.287)^2 \cdot 1.14 + (0.172)^2 \cdot 1.40) P_{dc} = 1.1553 P_{dc}$$

Förlusterna ökar med 15 % vid 200 Hz, vilket är acceptabelt.

Det är nödvändigt att dela upp lindningen i ett antal ledare. I detta fall skulle n i storleksordningen 10-20 vara lämpligt.

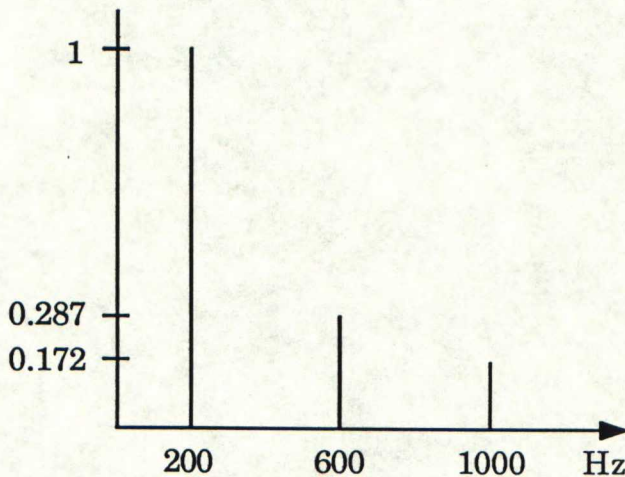


Fig 7.6 Första, tredje och femte övertonen i strömmen

7.5. Exempel på traktionstransformator

En traktionstransformator har dimensionerats. Tyngdpunkten har lagts vid kriterierna låg läckinduktans och jämn strömfördelning mellan sekundärlindningarna. Sekundärlindningarna är axiellt delade och primärlindningarna är placerade bredvid varandra. Detta minskar kärnfönsterbredden samt strömfördelningen blir relativt jämn i alla matningsfall. Nedan redovisas den dimensionerade trebens-transformatorn. De givna värdena ges i tabell 7.3. Läckinduktansen är vald till 3 mH, vilket är ett tillräckligt lågt värde för att tyristorerna skall kunna kommutera snabbt.

Typeffekt	9.6 MVA
Genomgångseffekt	5.0 MVA
Frekvens	200 Hz
Flödestäthet	1.4 T
Läckinduktans	3 mH
Reaktans	0.16 p.u.
Spänning hsp	15 kV
Spänning lsp	1.44 kV
Lindningsström hsp	333 A
Lindningsström lsp	867 A
/lindning	

Tabell 7.3 Givna värden i datorprogrammet

De beräknade värdena redovisas i tabell 7.4. Det extra lindnings-avståndet är 19.6 mm och kärnfönstrets totala bredd är 211 mm, dvs det extra avståndet utgör knappt 10 % av hela bredden.

Kärnradie	160.7 mm
Benhöjd	629 mm
Primärlindning:	
bredd	12.9 mm
höjd	529 mm
Sekundärlindning:	
bredd	27.9 mm
höjd	244.5 mm
Extra lindningsavstånd	19.6 mm

Tabell 7.4 Beräknade mått på transformatorn

Transformatorns vikt ökar ju lägre läckinduktansen väljs. Skillnaderna i vikt är inte stora, så en lägre läckinduktans kunde ha valts utan att viktökningen skulle ha varit betydande. Fig 7.7 visar förhållandet mellan läckinduktans och vikt. För läckinduktansen 3 mH väger lindningarna och kärnan tillsammans ca 1.7 ton.

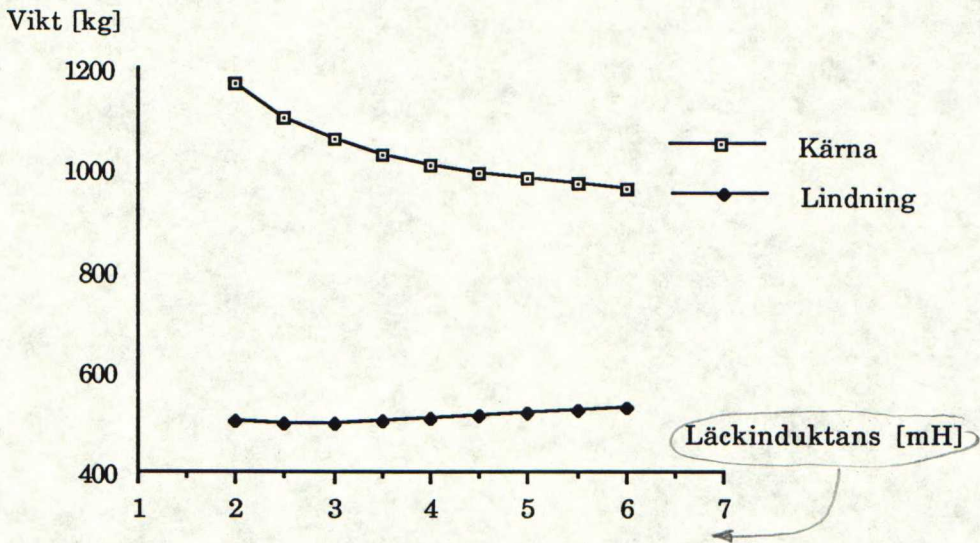


Fig 7.7 Förhållande mellan läckinduktans och kärn- och lindningsvikt.

Fig. 7.8 visar den dimensionerade transformatorn i skala 1:10. Transformatorn har ett litet kärnfönster, vilket är karaktäristiskt för en transformator med låg läckinduktans.

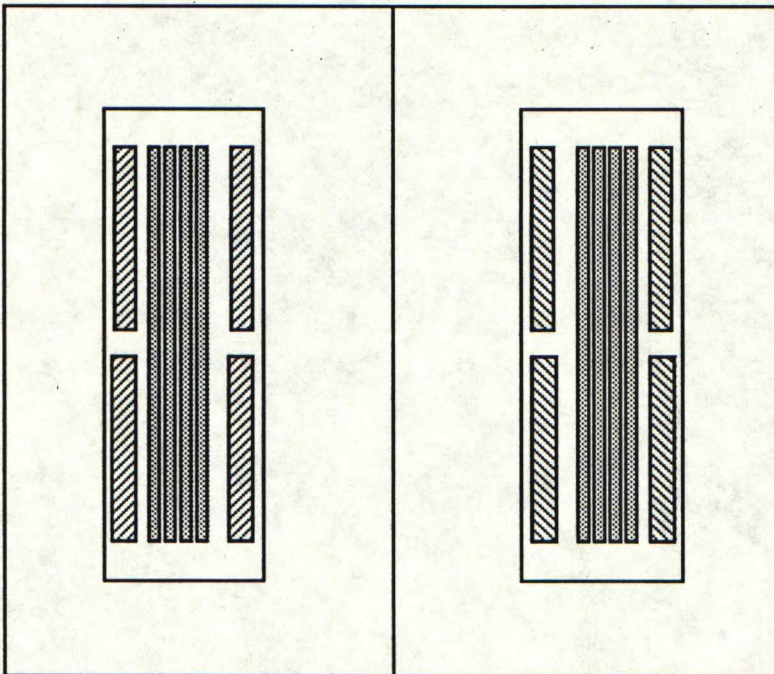


Fig 7.8 Dimensionerad transformator i skala 1:10

Strömfördelningen redovisas i tabell 7.5. Fastän extra isolering har satts in är stömfördelningen ändå inte exakt jämn. Det beror på att värdet för den extra isoleringen z är för litet.

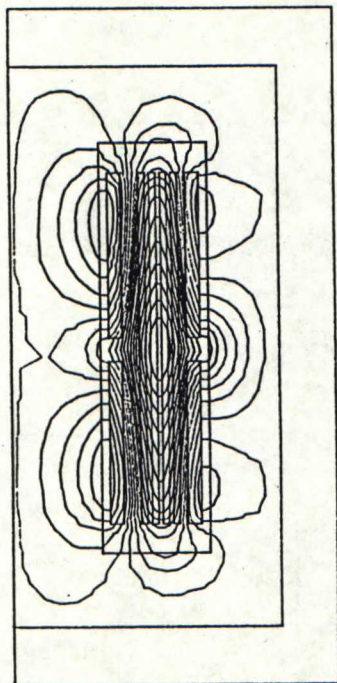
I formeln används medelradierna för lindningarna. Ett något större värde för radierna borde användas. En ökning av z med 1-2 mm torde göra strömfördelningen jämn.

I_1	I_2	I_3	I_4	I_5/I_7	I_6/I_8 [A]
333	333	333	333	-869	-838
333	0	333	333	-619	-661
333	0	0	333	-430	-423
0	0	333	0	-188	-239

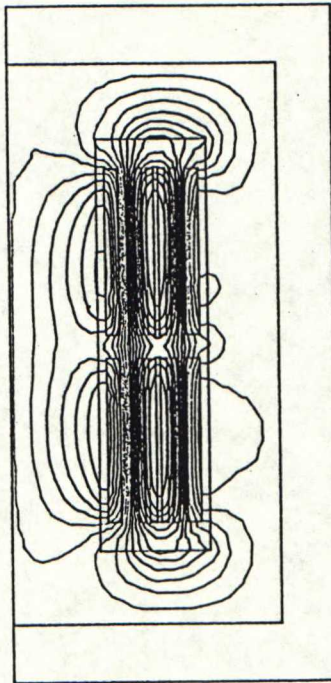
Tabell 7.5 Strömfördelning vid olika matningsfall

I tabellen har valts att mata de lindningar som ger den jämnaste fördelningen. Då alla primärlindningar matas får sekundärlindningarna närmast benet 51 % av strömmen, och de yttre sekundärlindningarna får 49 %. I ett fall då en eller tre lindningar matas blir fördelningen sämre, pga av den osymmertiska matningen. Fallet med två lindningar ger samma resultat som fyra lindningar.

Läckfältet i transformatorn visas i fig 7.9.a. I fig 7.9.b visas läckfältet då även primärlindningarna är axiellt delade. Läckfältet går mera axiellt i det fallet och är mera samlat i luftgapet. I a-fallet skär läckfältet lindningarna mera än i b-fallet. En axiell delning av primärlindningarna kan vara ett tänkbart alternativ.



a)



b)

Fig 7.9 Läckfält i transformatorn.

8. Slutsatser

Olika transformatormodeller har studerats och en transformatormodell med trebenskärna och koncentrisk lindning har valts. En transformator som uppfyller de av kretsen givna kraven har dimensionerats.

Den bästa placeringen av lindningarna har studerats både analytiskt och med Ace. Den valda modellen är en transformator med fyra primärlindningar bredvid varandra och sekundärlindningarna på var sida om primären. Sekundärlindningarna är axiellt delade. Med denna modell uppnås en relativt jämn strömfördelning. De olika matningsfallen ger inte upphov till bekymmer. För att uppnå en jämnare strömfördelning mellan sekundärlindningarna har avståndet mellan den innersta primärlindningen och de innersta sekundärlindningarna ökat med 20-25 mm, vilket ökar bredden på kärnfönstret med ca 10 %.

Läckinduktansen i transformatorn är tillräckligt låg för att möjliggöra en snabb kommutering av tyristorerna i högspänningsväxleriktaren. Med hjälp av ett datorprogram har lindningarnas storlek i förhållande till den önskade läckinduktansen beräknats. En låg läckinduktans har uppnåtts genom att använda smala och höga lindningar.

Lindningarnas och kärnans sammanlagda vikt har beräknats till 1.7 ton. Jämfört med värden som beräknats vid ABB Transformers i Ludvika är detta värde några hundra kilogram mindre. Detta beror troligen på att lindningarnas tjocklek i detta arbete har underskattats och att de i praktiken kräver mera utrymme.

9. Referenser

Carlsson, Åke. 1985. Power transformers design fundamentals, ABB Transformers, Ludvika.

Grundmark, Bengt. 1986. Läckfält och spänningsfall i krafttransformatorer, ABB Transformers, Ludvika.

Grundmark, Bengt. 1988. Titbits about transformers series impedance, ABB Transformers, Ludvika.

Gustavsson, Fredrik. 1989. Privat kommunikation.

Küchler Rudolf. 1956. Die Transformatoren, Springer-Verlag, Berlin.

Malmberg, Stig 1989. ABB Transformers. Privat korrespondens.

Östlund, Stefan. 1988. Reduction of traction-transformer weight by using a naturally commutated high-voltage inverter with increased frequency, Licentiatavhandling KTH, Stockholm.

Östlund, Stefan. 1989. Influence of the control principle on a high-voltage inverter system for reduction of traction-transformer weight. International Conference on Power Electronics and its application, EPE, Aachen, s. 561-566.